

doi: 10.11720/wtyht.2024.0056

张晓团, 李新林, 周斌, 等. 广域电磁法在北秦岭蟒岭矿集区深部找矿中的应用——以腰庄矿区为例[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1609–1617.
http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0056

Zhang X T, Li X L, Zhou B, et al. Application of wide-field electromagnetic sounding method to deep prospecting in the Mangling ore concentration area in North Qinling: A case study of the Yaozhuang ore district[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1609–1617. http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0056

广域电磁法在北秦岭蟒岭矿集区深部找矿中的应用 ——以腰庄矿区为例

张晓团¹, 李新林^{1,2}, 周斌^{1,2,3}, 高维强¹(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710004; 2. 陕西省地质调查规划研究中心, 陕西 西安 710068;
3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 蟒岭矿集区岩浆活动强烈, 是近年来北秦岭构造带深部找矿的热点地区, 区内钼矿的形成与晚侏罗世酸性小岩体关系密切。为实现该区深部找矿突破, 本文在重力异常圈定的腰庄隐伏岩体上开展了广域电磁法测量。测量结果显示, 深部存在明显的高阻异常, 推断高阻异常的凸起部位为腰庄隐伏岩体; 其电阻率反演结果基本刻画了该岩体的顶面变化特征, 推断顶面海拔介于-300~620 m、南北宽度 1 300~1 600 m。通过对优选出的深部成矿有利部位进行钻探验证, 揭示了隐伏岩体和隐伏钼矿体的存在。结果表明, 广域电磁法探测深度大、分辨率高, 是蟒岭矿集区深部找矿的有效勘查方法。

关键词: 广域电磁法; 深部找矿; 蟒岭矿集区; 北秦岭; 钼矿体

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2024)06-1609-09

0 引言

蟒岭矿集区处于东秦岭钼矿带南部之北秦岭构造带中段, 分布有潘河、景村、南台、马河等钼矿床以及一批钼多金属矿点^[1-3], 受晚侏罗世小岩体控制, 成矿类型为斑岩型、矽卡岩型、岩浆热液脉型^[4-7], 矿床规模以中小型为主。滕吉文等^[8-9]认为地表找矿进入严重的瓶颈期, 第二找矿空间(500~2 000 m)将成为新一轮战略性矿产找矿突破行动的主战场。蟒岭矿集区位于金堆城—宁陕 NE 向构造—岩浆岩带中段, 岩浆活动强烈, 以蟒岭酸性大岩基为代表, 其西缘分布有多个隐伏酸性小岩体, 显示出良好的深部找矿潜力。20 世纪 90 年代, 陕西省地矿局物化探队完成了陕南地区 1:20 万重力扫面工作, 在蟒岭岩体西部圈定了 1 处面积约 190 km² 的重力低

值异常(异常编号 L-052-77), 受比例尺精度和垂向分辨率相对较低的限制, 难以满足深部探测要求。自 2013 年以来, 陕西省地质勘查基金在蟒岭矿集区加大经费投入推进深部找矿工作, 在该区南部新发现了隐伏的寺沟钼矿, 矿体埋深一般在 380~1 400 m(海拔 750~-200 m); 西安西北有色地质研究院在该矿区进行了大量的可控源音频大地电磁法(CSAMT)工作, 圈出的低电阻层与含矿层(海拔 600~200 m)大致对应, 但圈定的高阻隐伏岩体(海拔-400 m 以深)经多个深部钻孔(最大孔深 1 511 m)验证, 均未发现隐伏岩体存在^[10], 反映以往 CSAMT 法受设备发射功率和多解性等因素影响, 不能满足该矿区的深部探测需求。在蟒岭矿集区要实现深部找矿突破, 关键在于如何利用有效的物探方法获取可靠的深部成矿信息, 筛选出可信度较高的隐伏岩体位置及成矿的有利部位, 降低勘查风险, 提

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 陕西省地质勘查基金项目(61201908334); 陕西省公益性地质调查项目(202112; 202308)

第一作者: 张晓团(1970-), 男, 高级工程师, 现从事深部找矿预测工作。Email: zhxitu@163.com

通讯作者: 李新林(1966-), 男, 正高级工程师, 现从事矿产勘查工作。Email: 541475896@qq.com

升深部勘查效率。目前,传统物探方法已难以满足大埋深、小尺度、复杂地质条件等深部精细探测要求,这些问题也是目前国内外深部找矿研究的难点和重点^[11-12]。

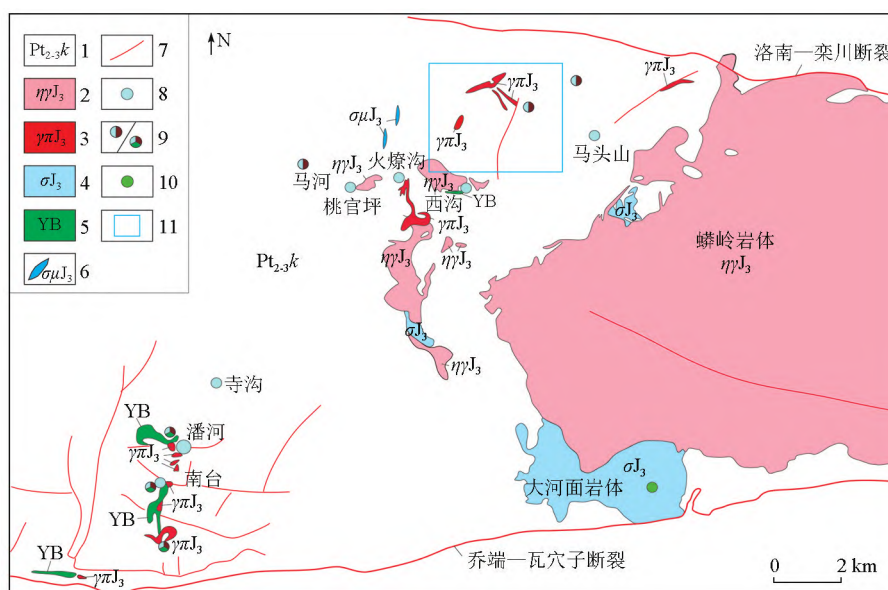
近年来,何继善院士提出的广域电磁法理论,在朱溪钨铜矿、胶东金矿等深部找矿、地热及油气等矿产资源勘查方面成效显著^[12-20]。因此,笔者在由1:5万重力资料圈出的腰庄隐伏岩体上,应用广域电磁法开展了深部找矿预测研究,探测该隐伏岩体的深部结构特征,优选成矿有利部位,指导深部钻探工程布置,为蟒岭矿集区岩浆热液型矿床的深部找矿

提供地球物理依据。

1 地质及地球物理特征

1.1 地质概况

蟒岭矿集区处于北秦岭构造带之宽坪裂谷,北以洛南—栾川断裂为界与华北地块南缘相接,南以乔端—瓦穴子断裂为界与北秦岭复合岛弧带相接^[21]。区内出露地层为中—新元古界宽坪岩群,为一套变质海相火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩建造(图1)。



1—中—新元古界宽坪岩群;2—晚侏罗世二长花岗岩;3—晚侏罗世花岗斑岩;4—晚侏罗世闪长岩;5—晚侏罗世隐爆角砾岩;6—晚侏罗世闪长玢岩;7—断裂;8—钼矿;9—铅锌矿/铜铅锌矿;10—铜矿;11—腰庄矿区

1—Neo-Mesoproterozoic Kuangping rock group;2—late Jurassic monzogranite;3—late Jurassic granite porphyry;4—late Jurassic diorite;5—late Jurassic phreatic breccia;6—late Jurassic diorite porphyry;7—fault;8—molybdenum deposit;9—lead-zinc deposit/copper-lead-zinc deposit;10—copper deposit;11—Yaozhuang ore district

图1 蟒岭矿集区区域地质简图

Fig.1 The geological sketch map of the Mangling ore concentration area

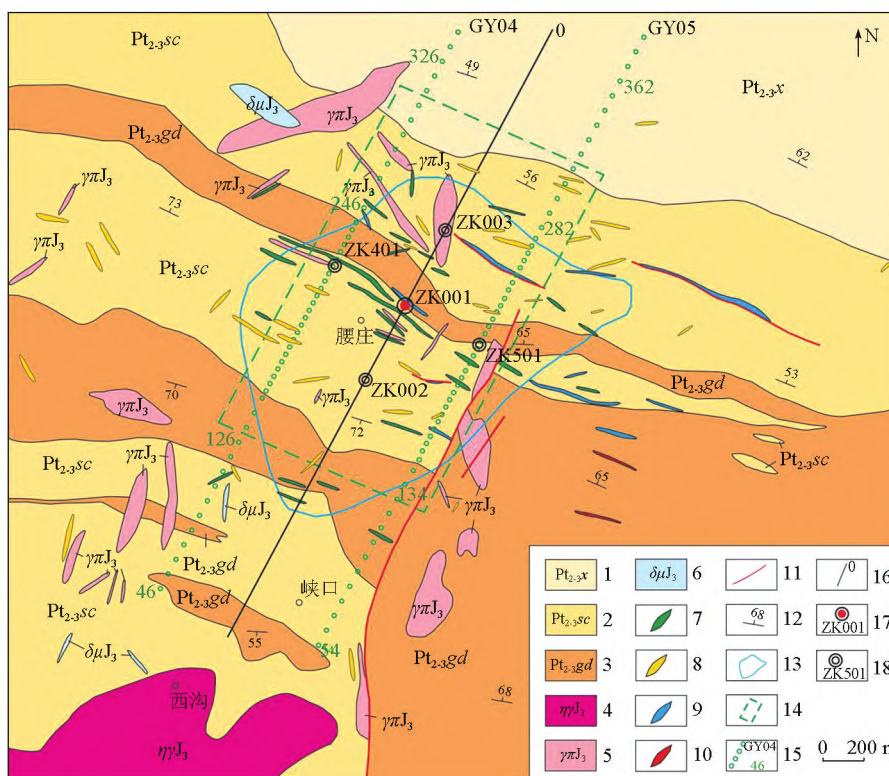
区内侵入岩发育,以蟒岭二长花岗岩和大河面闪长岩侵入岩体规模最大,出露面积 $>200 \text{ km}^2$;蟒岭侵入岩体的西侧10 km范围内发育大量中、酸性小岩体和隐伏岩体,以南台、桃官坪、火燎沟、西沟等酸性小岩体为代表,面积 $0.01 \sim 2.35 \text{ km}^2$,形成年龄介于157~140 Ma,小岩体内外接触带是该区Mo、W、Pb、Zn、Cu等矿产的主要含矿部位。

研究区位于蟒岭矿集区北部腰庄一带,区内地层主要为广东坪岩组钠长阳起片岩和四岔口岩组黑云石英片岩,东北角分布有少量谢湾岩组大理岩。区内构造线呈NWW向,主要有腰庄背形和近EW向、NE向断裂及伴生的次级裂隙(图2)。区内晚侏罗世侵入岩发育,与成矿关系密切,南部为西沟二长花岗岩侵入岩体,主要形成西沟钼矿;中部为重力异

常圈定的腰庄隐伏岩体,面积约 1.8 km^2 ;局部还分布有NE向、NWW向的花岗斑岩和闪长玢岩脉。区内地表分布有铅锌矿体,少量钼钨矿体,均赋存在NWW向断裂中。

1.2 地球物理特征

选取区内典型的新鲜岩石进行物性测量,由岩石电性参数统计(表1)可知,晚侏罗世花岗斑岩、二长花岗岩的电阻率平均值分别为 $1\,524.0 \, \Omega \cdot \text{m}$ 、 $1\,383.2 \, \Omega \cdot \text{m}$,呈高阻特征。广东坪岩组钠长阳起片岩的电阻率平均值为 $214.2 \, \Omega \cdot \text{m}$,呈低阻特征,四岔口岩组黑云石英片岩的电阻率平均值为 $785.3 \, \Omega \cdot \text{m}$,呈中阻特征,两者明显低于酸性岩体。由此可见,成矿侵入体与围岩存在明显的电阻率差异,具有开展广域电磁法工作的物性前提。



1—中—新元古界谢湾岩组;2—中—新元古界四岔口岩组;3—中—新元古界广东坪岩组;4—晚侏罗世二长花岗岩;5—晚侏罗世花岗斑岩;6—晚侏罗世闪长玢岩;7—黄铁矿化硅化蚀变岩;8—石英脉;9—铅锌矿体;10—钨钼矿体;11—断层;12—产状;13—腰庄隐伏岩体范围;14—广域电磁法推断钼成矿有利区;15—广域电磁法剖面点、线号及点号;16—0号勘探线剖面;17—已验证钻孔;18—设计钻孔

1—Neo-Mesoproterozoic Xiewan Formation;2—Neo-Mesoproterozoic Sichakou Formation;3—Neo-Mesoproterozoic Guangdongping Formation;4—late Jurassic monzogranite;5—late Jurassic granite porphyry;6—late Jurassic diorite porphyry;7—pyrite silicified altered rock;8—quartz vein;9—lead-zinc ore body;10—molybdenum-tungsten ore body;11—fault;12—occurrence;13—Yaozhuang concealed intrusion;14—metallogenic prospective areas of molybdenum by WFEM;15—WFEM profile station, number of line and point;16—exploration line 0 profile;17—experimental verification drill hole;18—design drill hole

图2 腰庄矿区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of Yaozhuang ore district

表1 研究区岩石电性参数统计结果

Table 1 Electrical parameter statistic of rock in the research area

填图单位	岩性名称	样品数/块	$\rho/(\Omega \cdot m)$	
			变化范围	均值
晚侏罗世侵入岩体	花岗斑岩	30	169.5~3937.8	1524.0
	二长花岗岩	32	254~2450.3	1383.2
中—新元古界广东坪岩组	钠长阳起片岩	31	68.2~487.7	214.2
中—新元古界四岔口岩组	黑云石英片岩	31	198.4~1910.9	785.3

2 工作方法

2.1 工作原理

本文采用人工场源的广域电磁法测量地下的电磁响应,用于查明腰庄矿区的地质构造和矿产分布特征^[16]。广域电磁法突破了“远区”的限制,在远区和非远区的广大区域范围进行测量,观测一个或多个

电磁场分量,利用全区视电阻率计算公式迭代计算视电阻率。该方法利用赤道偶极装置的 $E-E_x$ 观测方法进行探测,观测人工场源激励的电场水平分量 $E_x^{[22]}$:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)]。$$

广域意义上视电阻率的表达:

$$\rho_s = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)},$$

其中:

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN};$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN;$$

$$F_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)。$$

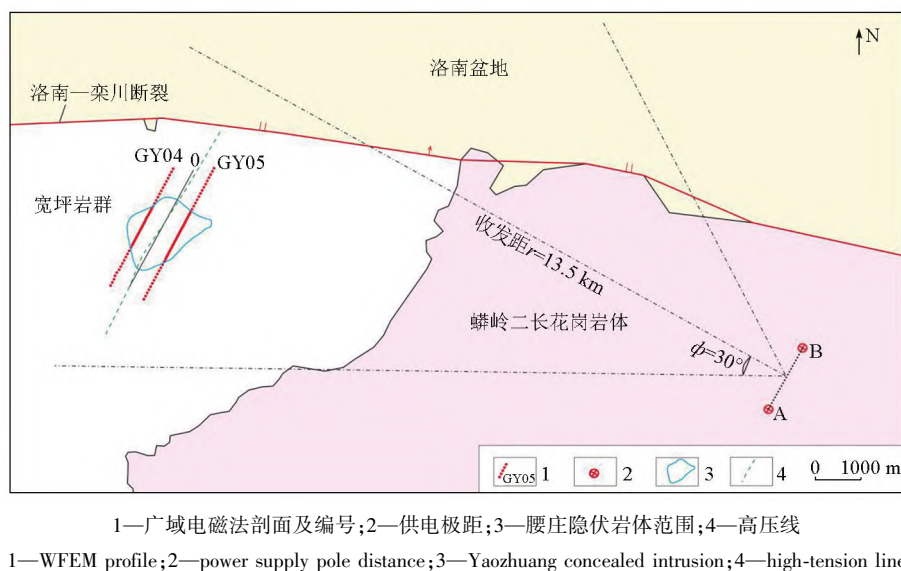
式中: K_{E-E_x} 为装置系数; k 为波数; r 为收发距; φ 为 AB 中心到接收点矢径与 AB 的夹角; I 为供电电流;

ΔV_{MN} 为观测点位差; dL 为 AB 供电极距; MN 为接收极距。由式中看出, 在视电阻率计算过程中兼顾考虑了发送电流、极距等装置系数和模型参数, 通过迭代计算获得最优视电阻率。

2.2 野外工作及采集效果

本次工作使用湖南继善高科技生产的 JSGY-2 广域电磁接收机(8 通道)及 180 kW 大功率

发送系统。野外数据收集利用广域电磁法中常用的 $E-E_x$ 装置, 观测 TM 模式电场, 布置一对接地电极产生的电流源作为人工场源, 测量与供电电极平行的水平分量 E_x 。 $E-E_x$ 装置的测量视域处于发射极距 AB 中垂线左半区 30° 范围, 供电极距 AB 布设平行于接收极距 MN 测量方向, AB 场源布置在洛南—栾川区域大断裂南侧的蟒岭二长花岗岩体中(图 3)。



1—广域电磁法剖面及编号; 2—供电极距; 3—腰庄隐伏岩体范围; 4—高压线
1—WFEM profile; 2—power supply pole distance; 3—Yaozhuang concealed intrusion; 4—high-tension line

图 3 广域电磁场源布设示意

Fig.3 Schematic diagram of wide field electromagnetic work layout

研究区的 0 号勘探线斜穿腰庄隐伏岩体中心, 但与高压线基本重合(图 3), 电磁干扰较严重。为此, 在 0 号勘探线两侧布设 GY04、GY05 两条平行剖面, 与 0 号勘探线相距均为 400 m, 剖面方位 28° , 与区内地层及构造线基本垂交, 长度分别为 2.94 km 和 3.40 km。本次供电极距 $AB=1.57$ km, 收发距 $r=13.5$ km, 剖面两端的接收极距 $MN=80$ m; 当穿过隐伏岩体范围, 采用 $MN=40$ m 的接收极距进行加密控制, 能够更好地揭示腰庄隐伏岩体边界及顶面变化趋势。

以往重力测量成果推断腰庄隐伏岩体顶面深度介于 500~1 000 m, 而广域电磁方法的有效探测深度远远大于腰庄隐伏岩体顶面深度, 本次探测目标深度为 3 000 m, 估算研究区地层平均电阻率取 $710 \Omega \cdot m$ 。根据探测深度经验公式 $D=356 \sqrt{\rho/f}$ 计算得出, 达到 3 000 m 探测深度的最低理论采集频率为 10 Hz。通过理论计算和以往勘查经验, 本次观测 8 个频组, 分别是 1、3、4、5、7、8、9、11 频组, 共 54 个频点, 频率范围 3/256~8 192 Hz, 可以满足本次探测要求。数据采集过程中, 高频组叠加 50~100 次, 中频叠加 15 次左右, 低频叠加大于 5 次, 获得的

数据质量准确可靠。

从 GY04 剖面上 126 点与 160 点的频率—电场—视电阻率曲线(图 4)可以看出, 高阻岩体异常区与背景低阻区的曲线形态光滑, 无明显锯齿状或跳跃现象; 当岩体侵入时, 曲线中段的电阻率陡升明显, 这与实际物性资料吻合, 反映了本次广域电磁测深工作采集到的野外数据质量可靠。

2.3 数据处理及解释简介

本次野外数据资料处理运用何继善院士团队开发的地球物理综合解释系统(GMES3DI), 通过数据处理、连续介质二维反演、连续介质二维约束反演、地震偏移成像等功能, 实现对广域电磁数据一体化处理解释。首先, 对采集的原始数据质量进行评价, 对个别畸变的频点进行剔除或平滑处理, 并进行静态效应与地形校正, 迭代计算视电阻率; 然后, 开展人机交互反演, 绘制视电阻率拟合断面图, 定性分析电性分布结构; 最后, 遵循由已知到未知的原则, 结合实测地质剖面、岩石物性参数和钻探资料, 进一步调整反演参数, 合理地对电性断面进行解释推断, 建立地球物理—地质模型。

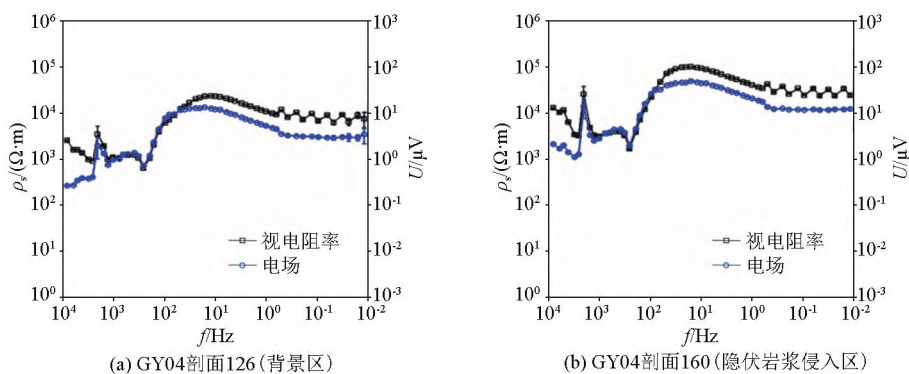


图 4 试验点电场和视电阻率随频率变化曲线

Fig.4 Frequency variation curves following electrical field and apparent resistivity curves at experimental points

3 电磁场特征分析

依据广域电磁法的频率—视电阻率曲线类型、等频率视电阻率曲线及频率—视电阻率拟断面成果,对初始成果进行定性分析及解释,可有效地提高定性推断解释的准确度^[18,23]。从图 5a 可以看出, GY04 剖面视电阻率横向曲线类型较为相似,纵向变化明显,以 G 型为主,反映深部存在高阻隐伏岩体,其中 142 点~248 点(红色曲线)之间的曲线中段电阻率陡升,与上侵的隐伏高阻岩体位置基本对

应。依据电阻率曲线形态特征进一步将剖面分为 4 层结构(HK 型),即浅部高阻层($\lg f \in [2.58, 3.91]$)、中浅部低阻层($\lg f \in [1.98, 2.58]$)、中部高阻层($\lg f \in [1.0, 1.98]$)、深部高阻层($\lg f < 1.0$)4 层结构。结合深部地质认识,认为中部高阻层和深部高阻层分别代表了受热液作用影响的中部地层($\lg \rho < 4.2$)和深部侵入岩($\lg \rho > 4.2$)。GY04 剖面等频率视电阻率曲线(图 5b)中的高频曲线较为起伏,而低频曲线较光滑,中频存在一个明显的梯度带,反映了浅表地层相对电阻率变化较快,深部曲线光滑,说明深部岩浆发育,且具有相当的规模,中频的梯度带应为

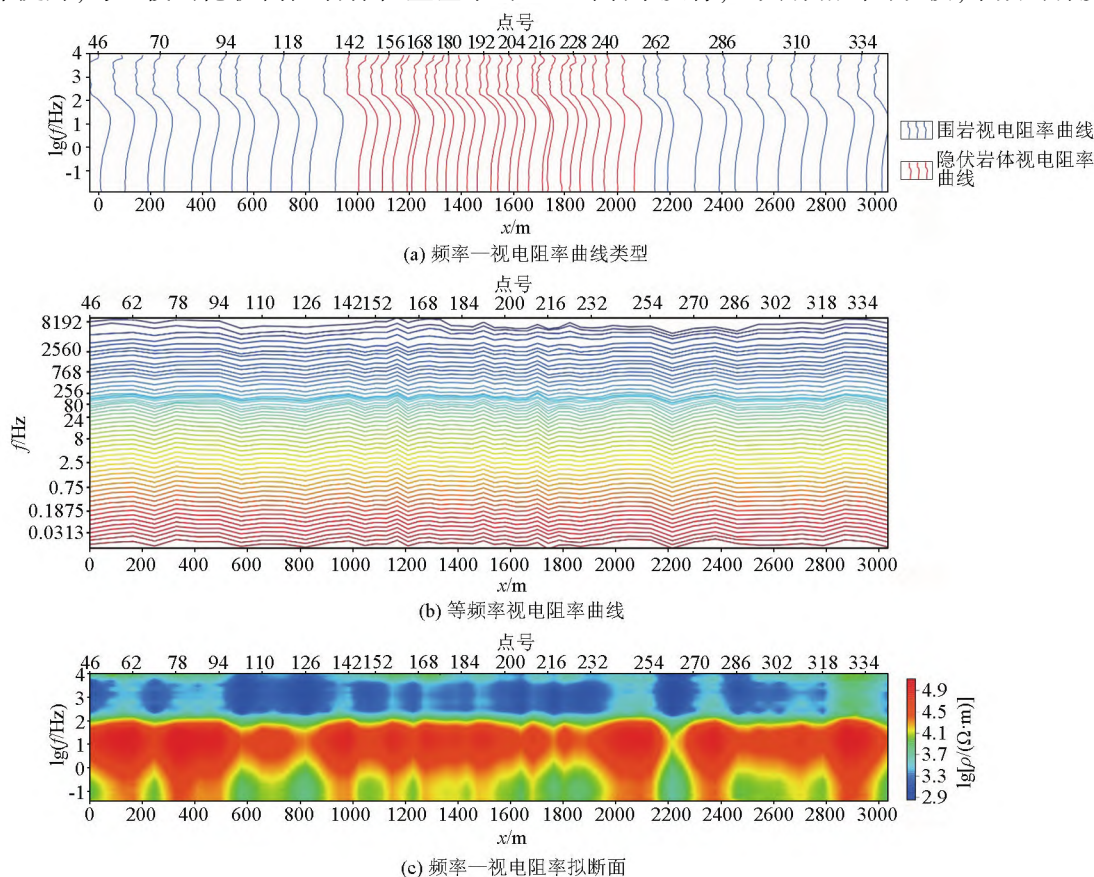


图 5 GY04 剖面视电阻率综合断面

Fig.5 Apparent resistivity comprehensive section of GY04 profile

地层与高阻岩体的分界面,是本次工作最为重要的地质界面。GY04 剖面的频率—视电阻率拟断面(图 5c)与等频率视电阻率曲线高度关联,低阻地层与高阻岩体界线清晰,整体特征与区内地质认识相符。

GY05 剖面三类曲线类型与 GY04 剖面总体特征相似,其频率—视电阻率曲线类型也为 G 型或 HK 型,而代表上侵隐伏岩体的红色曲线位置、幅值基本一致,但范围变小,反映岩体在研究区东部规模变小;其等频率视电阻率曲线出现缓慢隆起,反映岩体在东部侵位略高,顶面深度变浅。总体上,两条剖面深部明显的高阻异常与区内花岗岩物性参数一致,不同于围岩黑云石英片岩、钠长阳起片岩的中低阻特征,为二维反演解释推断深部隐伏岩体空间形态奠定了基础。

4 反演解释与应用效果

4.1 反演解释

根据定性分析认为腰庄深部存在高阻岩体,为进一步刻画其深部分布特征,以一维 Occam 反演结果作为初始模型,采用带地形的非线性共轭梯度(NLCG)法进行二维连续介质反演,在电阻率断面成果上进行解释与推断。

GY04 剖面反演结果(图 6a)显示,海拔 600 m 之下存在一个规模较大的高阻异常($\lg \rho > 4.2$),异常在剖面 500~800 m 存在局部下凹,在 1 000~2 600 m 异常向上凸起。结合物性特征,认为该高阻异常为隐伏花岗岩体的反映,而局部下凹是由围岩地层的残留引起的,推断凸起部位为隐伏腰庄岩体,其顶面海拔介于

-300~620 m,宽度 1 600 m(图 6b)。GY05 剖面上的高阻异常变化趋势(图 7a)与 GY04 剖面上的异常变化相似,但异常范围变小、形态局部有所差异,其分布在海拔 400 m 之下($\lg \rho > 4.2$),在剖面 1 000~2 300 m 有明显向上凸起,推断凸起部位也是由隐伏腰庄岩体引起,其顶面海拔介于 100~380 m,宽度 1 300 m(图 7b)。

综上所述,两条剖面电阻率异常分带明显,浅部的中低阻对应钠长阳起片岩和黑云石英片岩,深部高阻凸起部位为腰庄隐伏岩体,揭示岩体顶面总体北倾,顶面深度自南向北逐渐变大,岩体自西向东连续性好,仅略微变浅。

4.2 应用效果

汤中立院士建立的小岩体成(大)矿理论提出酸性岩体的成矿有利部位多处于小岩体的头部及接触带^[24-27],结合蟒岭矿集区钼成矿模式^[7],在两条剖面推断的腰庄隐伏岩体顶部 200 m 及接触带外 500 m 范围分别圈定了钼成矿的有利部位(图 6b、图 7b);同时基于前文推断,腰庄隐伏岩体在 EW 向上顶面深度变化小及连续性好,故进一步在岩体顶上带圈出钼成矿有利区(图 2)。为验证与隐伏岩体相关的隐伏矿体,在综合考虑重力圈出的隐伏岩体范围内和地表矿化蚀变分布的基础上,选择在钼成矿有利区中心部位进行验证(图 2),即在 0 号勘探线约 1 620 m 处布设一个钻孔(ZK001)。验证结果显示(图 8),在孔深 884.97 m 发现隐伏花岗岩体,钻孔控制的岩体顶面与 GY04、GY05 剖面推断的岩体顶面深度相差分别为 128 m、38 m,说明反演隐伏岩体顶面深度在合理的误差范围内;同时在岩体外接触带新发现钼矿(化)体 12 条,厚度 0.29~2.0 m,累计厚度 9.93 m,Mo 品位 0.150%~0.101%^[28],取得良好的勘查示范效果。因此,基于验证发现的隐伏岩

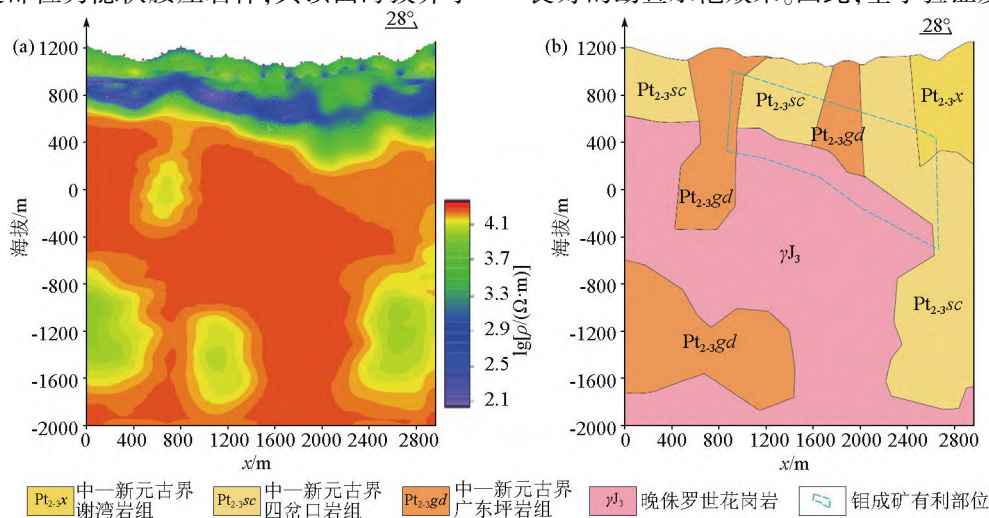


图 6 广域电磁法 GY04 反演电阻率剖面(a)和地质解释(b)

Fig.6 Inversion resistivity section(a) and geological interpretation (b) of GY04 by WFEM

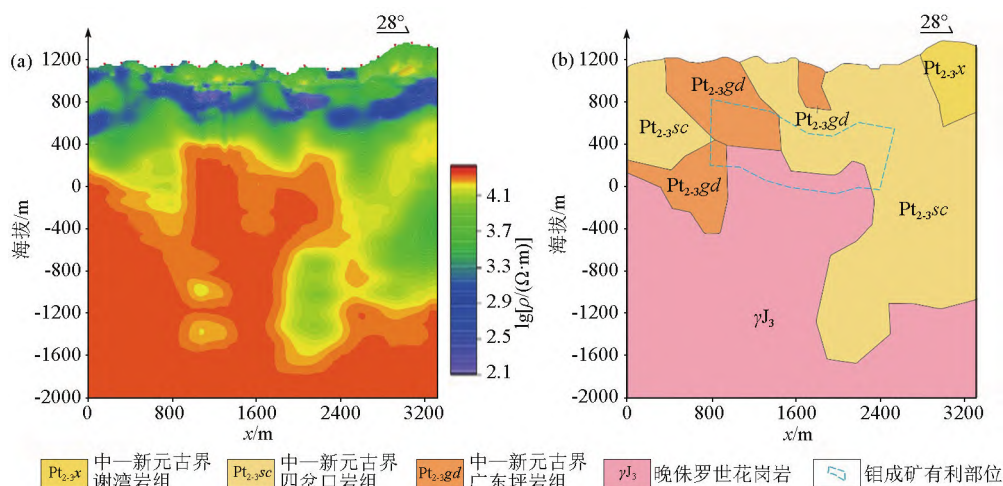
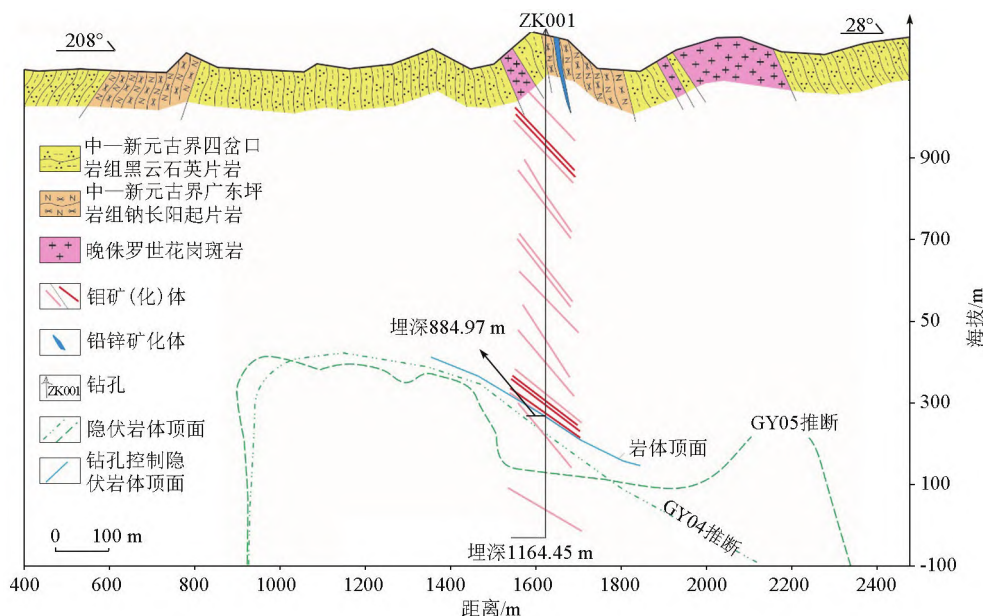


图7 广域电磁法 GY05 反演电阻率剖面(a)和地质解释(b)

Fig.7 Inversion resistivity section(a) and geological interpretation (b) of GY05 by WFEM

图8 腰庄矿区0号勘探线综合断面图(据周斌等^[28]修改)Fig.8 Comprehensive cross-sectional map of exploration line 0 in the Yaozhuang ore district(modified by Zhou et al.^[28])

体和钼矿体,应加大对钼成矿有利区的勘探力度,围绕钻孔 ZK001 在 0 号勘探线、GY04 和 GY05 剖面上布设钻孔(图 2),进一步探寻厚大矿体。

5 结论

1) 广域电磁法探测结果圈出的高阻异常区为腰庄隐伏岩体,推断岩体顶面海拔约-300~620 m,南北宽约 1 300~1 600 m,揭示岩体顶面总体北倾,顶面深度自南向北逐渐变深、自西向东略微变浅。

2) 基于电阻率反演获得的电性结构,结合地质资料,经钻孔验证,发现了隐伏岩体和隐伏矿体,初步确定研究区寻找隐伏岩体的地球物理异常目标是高阻异常。

3) 广域电磁法在研究区有效揭示了 3 000 m 以浅的成矿地质体的电性变化规律,探测高阻岩体效果明显,为该地区深部找矿提供了有效的勘查技术方法。

致谢:感谢陕西省地质调查院范鹏、俱晓东、皇甫鹏斌、杨文博、江勇卫、武忠山等同事对野外工作和本文工作给予大力支持。

参考文献(References):

- [1] 李诺,陈衍景,张辉,等.东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J].地质前缘,2007,14(5):186-198.
Li N, Chen Y J, Zhang H, et al. Molybdenum deposits in East Qinling [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 186-198.
- [2] 卢欣祥,罗照华,黄凡,等.小岩浆大流体成大矿与透岩浆流体成矿作用——以东秦岭—大别山成矿带钼矿床为例[J].岩石学报, 2017, 33(5): 1554-1570.

- Lu X X, Luo Z H, Huang F, et al. "Small" magma and "big" fluid lead to form large scale deposit and transmagmatic fluid mineralization: Take for example of Mo deposits in eastern Qinling-Dabie mountain metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1554-1570.
- [3] 柯昌辉, 王晓霞, 李金宝, 等. 北秦岭马河钼矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 267-278.
- Ke C H, Wang X X, Li J B, et al. Geochronology and geological significance of the granites from the Mahe Mo deposit in the North Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(1): 267-278.
- [4] 柯昌辉, 王晓霞, 杨阳, 等. 北秦岭南台钼多金属矿床成矿年龄及锆石 Hf 同位素组成[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1562-1576.
- Ke C H, Wang X X, Yang Y, et al. Rock-forming and ore-forming ages of the Nantai Mo polymetallic deposit in North Qinling Mountains and its zircon Hf isotope composition[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1562-1576.
- [5] 张元厚, 毛景文, 简伟, 等. 东秦岭地区钼矿床研究现状及存在问题[J]. *世界地质*, 2010, 29(2): 188-202.
- Zhang Y H, Mao J W, Jian W, et al. Present status of research on molybdenum deposit in eastern Qinling and the problems remained[J]. *Global Geology*, 2010, 29(2): 188-202.
- [6] Fan P, Xi A H, Zhou B, et al. Discovery of Yaozhuang stock and deep ore prospecting implication for the western mangling orefield in North Qinling terrane, Central China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 830453.
- [7] 周斌, 李新林. 北秦岭蟒岭地区斑岩型—热液脉型钼矿深部找矿勘查技术方法研究[C]//第二届全国矿产勘查大会, 2023.
- Zhou B and Li X L. Research in deep prospecting and exploration technology and method of porphyry-magmatic hydrothermal molybdenum deposit in Mangling area, North Qinling[C]//The 2nd National Mineral Exploration Conference, 2023.
- [8] 滕吉文, 薛国强, 宋明春. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3975-3985.
- Teng J W, Xue G Q, Song M C. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3975-3985.
- [9] 滕吉文. 高精度地球物理学是创新未来的必然发展轨迹[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(4): 1131-1144.
- Teng J W. High-precision geophysics: The inevitable development track of the innovative future[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(4): 1131-1144.
- [10] 杨海涛, 刘新伟, 汪超, 等. 蟒西寺沟斑岩—矽卡岩型钨钼矿物化探异常特征及找矿模型[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(5): 929-939.
- Yang H T, Liu X W, Wang C, et al. Geophysical and geochemical anomaly characteristics and ore prospecting model for the sigou porphyry-skarn type tungsten-molybdenum deposit in mangxi area[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(5): 929-939.
- [11] 程红军, 陈川, 展新忠, 等. 隐伏矿床成矿预测理论与方法新进展[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(3): 456-463.
- Cheng H J, Chen C, Zhan X Z, et al. New progress in the prediction theory and prospecting method for concealed deposits[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(3): 456-463.
- [12] 陈后扬, 李帝铨, 凌帆, 等. 朱溪钨铜矿的广域电磁法深部探测[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(10): 3227-3243.
- Chen H Y, Li D Q, Ling F, et al. Deep exploration of wide field electromagnetic method in Zhuxi W-Cu deposit[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(10): 3227-3243.
- [13] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(3): 1065-1072.
- He J S. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [14] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(9): 1809-1816.
- He J S. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 1809-1816.
- [15] 何继善. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 985-990.
- He J S. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 985-990.
- [16] 何继善. 伪随机信号广域电磁法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- He J S. Wide-area electromagnetic method of pseudo-random signal[M]. Beijing: Higher Education Press, 2023.
- [17] 凌帆, 朱裕振, 周明磊, 等. 广域电磁法在南华北盆地长山隆起页岩气资源潜力评价中的应用[J]. *物探与化探*, 2017, 41(2): 369-376.
- Ling F, Zhu Y Z, Zhou M L, et al. Shale gas potential assessment of Changsan uplift area in southern North China basin by using wide field electromagnetic method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(2): 369-376.
- [18] 王润生, 张保涛, 柳森, 等. 胶东牟平—乳山成矿带金青顶金矿广域电磁法探测效果分析[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(2): 381-390.
- Wang R S, Zhang B T, Liu S, et al. Application effects of the wide field electromagnetic method in the jinqingding gold deposit in Muping-Rushan metallogenic belt, Jiaodong peninsula[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(2): 381-390.
- [19] 邵炳松, 阮传侠, 赵苏民, 等. 广域电磁法在郑州地区深部地热资源勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(2): 316-327.
- Shao B S, Ruan C X, Zhao S M, et al. The application of wide field electromagnetic method to deep geothermal resources exploration in Zhengzhou area[J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(2): 316-327.
- [20] 王丹丹, 张交东, 刘旭峰, 等. 广域电磁法在豫西地区济源凹陷古生界油气勘探中的应用[J]. *地质与勘探*, 2023, 59(2): 328-336.
- Wang D D, Zhang J D, Liu X F, et al. Application of the wide field electromagnetic method to Paleozoic oil and gas exploration in the Jiyuan depression of western Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 2023, 59(2): 328-336.
- [21] 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. *地球学报*, 2003, 24(1): 3-10.

- Dong Y P, Zhang G W, Zhu B Q. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling terrane [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(1): 3–10.
- [22] 王洪军, 熊玉新. 广域电磁法在胶西北金矿集中区深部探测中的应用研究[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1039–1047.
- Wang H J, Xiong Y X. The application of wide field electromagnetic method to deep exploration in Jiaoxibei (northwest Shandong) gold concentration area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1039–1047.
- [23] 李帝铨, 肖教育, 张继峰, 等. WFEM 与 CSAMT 在新元煤富水区探测效果对比[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1359–1366.
- Li D Q, Xiao J Y, Zhang J F, et al. Comparison of application effects of WFEM and CSAMT in water-rich area of Xinyuan Coal Mine [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1359–1366.
- [24] 汤中立, 焦建刚, 闫海卿, 等. 小岩体成(大)矿理论体系[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(2): 4–18, 2.
- Tang Z L, Jiao J G, Yan H Q, et al. Theoretical system for (large) deposit formed by smaller intrusion [J]. *Strategic Study of CAE*, 2015, 17(2): 4–18, 2.
- [25] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 1–9.
- Tang Z L, Qian Z Z, Jiang C Y, et al. Trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits and small intrusions metallogenic system [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 1–9.
- [26] Sillitoe R H. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3–41.
- [27] 金露英, 秦克章, 李光明, 等. 斑岩钼—热液脉状铅锌银矿成矿系统特征、控制因素及勘查指示[J]. *岩石学报*, 2020, 36(12): 3813–3839.
- Jin L Y, Qin K Z, Li G M, et al. Characteristics, controlling factors and exploration implications of porphyry molybdenum-hydrothermal vein-style lead-zinc-silver metallogenic systems [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(12): 3813–3839.
- [28] 周斌, 范鹏, 杨文博, 等. 陕西典型小岩体成矿预测与勘查示范成果报告[R]. 西安市: 陕西省地质调查规划研究中心, 2024.
- Zhou B, Fan P, Yang W B, et al. Report on metallogenic prediction and exploration demonstration of typical small rock masses in Shaanxi province [R]. Xi'an: Shaanxi geological survey planning research center, 2024.

Application of wide-field electromagnetic sounding method to deep prospecting in the Mangling ore concentration area in North Qinling: A case study of the Yaozhuang ore district

ZHANG Xiao-Tuan¹, LI Xin-Lin^{1,2}, ZHOU Bin^{1,2,3}, GAO Wei-Qiang¹

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710004, China; 2. Shaanxi Geological Survey Planning Research Center, Xi'an 710068, China; 3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Mangling ore concentration area with intense magmatic activity has become a focal area for deep prospecting in the North Qinling tectonic belt in recent years. The formation of molybdenum deposits in this area is closely related to small Late Jurassic acidic intrusions. To achieve breakthroughs in deep ore prospecting within this area, this study conducted the wide-field electromagnetic sounding over the concealed Yaozhuang intrusion delineated based on gravity anomalies. The results indicate the presence of pronounced high-resistivity anomalies at depth, and it is inferred that the protruding part of the anomalies corresponds to the concealed Yaozhuang intrusion. The resistivity inversion results roughly delineated the variations in the top surface of the intrusion, with the elevations and N-S width of the top surface estimated at 300–620 m and 1300–1600 m, respectively. Drilling in the most favorable deep mineralized part confirmed the presence of the concealed intrusion and concealed molybdenum ore bodies. The results of this study demonstrate that the wide-field electromagnetic sounding method exhibits great sounding depths and high resolutions, serving as an effective method for deep ore prospecting in the Mangling ore concentration area.

Key words: wide-field electromagnetic method (WFEM); deep exploration; Mangling ore concentration area; North Qinling; molybdenum ore body

(本文编辑:朱晓颖)